

# Ottimizzazione dei cambi utensile nelle lavorazioni per asportazione di truciolo

Maurizio Barbuti, Marco Mancino, Matteo Pani, Michele Lanzetta

Sommario.....	1
Abstract.....	1
1. Introduzione .....	2
3. Caso di studio: ottimizzazione dei fermi macchina nelle lavorazioni per asportazione di truciolo .....	3
3.1 Descrizione del problema .....	3
3.2 Possibile soluzione.....	4
3.3 Modello analitico del costo di una lavorazione per asportazione di truciolo .....	6
4. Descrizione del foglio di calcolo .....	9
4.1 Foglio CALCOLI PIAGGIO .....	11
4.2 Foglio GRAFICI PIAGGIO.....	14
4.3 Foglio CALCOLI PIAGGIO(2).....	17
4.4 Uso del foglio di calcolo.....	20
5. Risultati.....	20
6. Conclusioni .....	21
Ringraziamenti.....	21
Bibliografia .....	21

## **Sommario**

Questo articolo si propone di esporre un metodo per l'ottimizzazione del processo di lavorazione per asportazione di truciolo mettendo in evidenza l'andamento dei costi in funzione del numero di sostituzioni degli utensili durante la lavorazione di un lotto di pezzi. Tale analisi è valida unicamente per lavorazioni eseguite su un solo pezzo, in particolare si fa l'ipotesi che non ci siano vincoli relativi ai tempi di produzione tra le varie lavorazioni. Viene descritta anche una possibile implementazione tramite foglio di calcolo.

## **Abstract**

The main purpose of this article is to describe an optimization method in machining operations. The production cost is determined as a function of tool changes for a given batch of products. Current analysis is suitable for machining only one item and it does not take into account constraints related to production times between the different operations. A possible implementation of the method by an electronic data sheet is also provided.

## 1. Introduzione

Lo studio per l'ottimizzazione dei processi per asportazione di truciolo è affrontato in letteratura seguendo tre possibili criteri in modo da realizzare o un *ottimo economico*, o un *ottimo produttivo*, o infine un *ottimo di profitto*.

Questi criteri permettono di determinare i parametri di taglio (velocità di taglio ed avanzamento) tali da minimizzare rispettivamente il costo (€/pezzo) o il tempo dell'intera lavorazione (min./pezzo) e quindi massimizzare la produttività (pezzi/min.), o ancora la redditività della lavorazione (€/min.). Possono però verificarsi situazioni particolari nelle quali possono prevalere altri criteri quali, ad esempio, quello di assicurare il pieno impiego del personale, la saturazione di un macchinario, oppure rispondere a particolari richieste del mercato, ecc.

Tali analisi forniscono valori numerici che non tengono conto delle *condizioni limite*, vale a dire vincoli di vario tipo, come per esempio quelli tecnologici (potenza dei macchinari, numero massimo di giri del mandrino, rugosità superficiale del pezzo ottenuto, ecc.).

In generale la scelta dei parametri di taglio è legata strettamente ai seguenti aspetti: durata del tagliente, materiale dell'inserto, materiale del pezzo, condizioni di taglio, geometria dell'inserto, stabilità della lavorazione, vibrazioni, sovrametalli da asportare. Quello che tuttavia vincola maggiormente i parametri di taglio, in particolare nelle operazioni di finitura, è la rugosità superficiale desiderata a fine lavorazione, che come è noto risulta ad essi legata e può anche essere stimata tramite modelli analitici accurati. Quale che sia la strategia di scelta dei parametri, occorre in ogni caso verificare che non siano violati i vincoli tecnologici, con parametri troppo elevati che possono causare: insorgenza di vibrazioni, eccessive deformazioni del pezzo e dell'utensile, problemi di controllo del truciolo, superamento rugosità ammissibile, massima potenza disponibile al mandrino, massima velocità angolare del mandrino e massimo avanzamento disponibile. Esistono anche limiti inferiori, in particolare per quanto riguarda la velocità di taglio (fenomeno del cosiddetto tagliente di riporto) e l'avanzamento (fenomeno del rifiuto del tagliente da parte della superficie da lavorare).

Le fonti di informazione principalmente usate per questa scelta sono i dati forniti dai produttori di utensili o quelli disponibili in base a dati resi disponibili da utilizzatori o ricercatori.

Viene riportata una bibliografia essenziale su testi universitari in italiano. La teoria dell'ottimizzazione delle lavorazioni per asportazione di truciolo ha avuto un rapido

sviluppo nella letteratura scientifica fino agli anni 80, in cui sono state poste le basi per una formalizzazione del problema. Sono state determinate le principali espressioni analitiche che legano i parametri economici ai parametri di lavorazioni e i vincoli tecnologici esistenti. Alcune tali espressioni sono descritte in dettaglio in questo articolo.

La soluzione del problema dell'ottimizzazione per i casi reali presenta un numero talmente elevato di variabili da richiedere sofisticate tecniche numeriche. Molti ricercatori continuano a proporre soluzioni, ad esempio basate sull'intelligenza artificiale, che presentano limiti importanti alla loro applicazione pratica, pertanto il problema sembra ancora aperto.

Questo articolo si limita a richiamare le basi teoriche principali e propone un metodo analitico che, seppur approssimato, è di immediata applicazione in ambito industriale.

Tale metodo è relativo ad *una singola* operazione, quindi non si può applicare direttamente ad una sequenza di operazioni oppure ad una linea di produzione, se si desidera una maggiore approssimazione dell'ottimo.

A titolo di esempio si farà riferimento ad una lavorazione di tornitura per la quale sono fissati a priori i valori di avanzamento e profondità di passata, per i motivi tecnologici suddetti: per avere una trattazione che includa la variazione anche di questi due ultimi parametri si dovrebbero introdurre ulteriori relazioni.

Il metodo risulta applicabile anche ad altre lavorazioni alle macchine utensili per asportazione di truciolo, prestando la dovuta attenzione alle unità di misura per la velocità di taglio (m/min., m/s) ed avanzamento (mm/giro, mm/min.) ed alle espressioni che regolano il calcolo dei tempi attivi di lavorazione, corrispondenti alla tipologia di lavorazione o macchina in esame.

## **3. Caso di studio: ottimizzazione dei fermi macchina nelle lavorazioni per asportazione di truciolo**

### **3.1 Descrizione del problema**

Vengono riportate delle simulazioni per un caso pratico, relativo alla Società Piaggio di Pontedera (PI), ma di ampio interesse. Si tratta di una fase di un ciclo di lavoro relativo ad un albero in acciaio per scooter, svolta su una macchina a controllo numerico cosiddetta

“speciale”, vale a dire costruita appositamente per una ben definita gamma di lavorazioni, in questo caso l’esecuzione di alberi. Il centro di lavoro in questione, che d’ora in poi identificheremo con la sottofase stessa, prevede l’utilizzo di 15 utensili, alcuni dei quali lavorano simultaneamente, al fine di massimizzare la produttività.

A questo livello di approssimazione non si tiene conto dei vincoli sulla durata delle diverse operazioni in modo da rispettare la cadenza produttiva. Nel caso specifico la stazione è alimentata da un buffer di pezzi che la svincola dalle fasi a monte e a valle.

Lo scopo di questa ottimizzazione è quello di raggruppare gli interventi di sostituzione inserti. Nell’esempio, con un set di 15 utensili non è opportuno fermare la macchina ogni volta che un inserto è usurato, ma è preferibile riunire in un numero limitato di fermo macchina tutte le sostituzioni. Questa esigenza si traduce ovviamente in uno sfruttamento non ottimale di alcuni inserti, è compito del tecnologo stabilire quali utensili del set sia conveniente sfruttare di più.

Il raggiungimento di un tale risultato presenta indubbi vantaggi, in quanto la macchina viene fatta fermare meno volte e ciò comporta

- una riduzione dei tempi “morti” (improduttivi) ed
- un miglioramento delle condizioni di lavoro del personale in quanto si ottiene come vantaggio una migliore cadenza del ritmo di lavoro durante il turno operativo senza che si verifichino picchi di lavoro intenso alternati ad intervalli di minore attività. Inoltre è più semplice programmare l’impegno dell’operatore.

### **3.2 Possibile soluzione**

L’analisi che segue potrà servire a determinare l’andamento dei costi di produzione per la fase di lavorazione considerata, relativi cioè alla macchina ed allo specifico pezzo lavorato sulla macchina (l’analisi può essere ripetuta per altre fasi e altri prodotti) al variare dei parametri fondamentali sopra menzionati: la velocità di taglio e la durata dell’ inserto.

Questo problema non è banale, in quanto si richiede di impostare i parametri di taglio in modo tale che il numero di pezzi che gli utensili possano lavorare nella loro vita utile siano multipli fra loro, o meglio siano multipli di un valore di riferimento o massimo comun divisore  $N_t$ .

Il modo in cui verrà affrontato il problema è quello di costruire il foglio di calcolo descritto di seguito in dettaglio per l’ottimizzazione del costo.

Verranno pertanto determinati e rappresentati graficamente il costo delle lavorazioni in una fase di fabbricazione dell'albero di uno scooter e il costo totale relativo all'intero lotto di alberi, in funzione del numero di fermi macchina, o meglio del numero di pezzi lavorati dai vari inserti.

**Tabella 1 Simboli impiegati nella trattazione analitica della stima dei costi di lavorazione**

<b>Lista dei simboli</b>
$C_T$ = Costo totale della lavorazione espresso in €
$C_{T\_x\_pezzo}$ = Costo totale per pezzo della lavorazione espresso in €/pezzo
$C_p$ = Costo unitario del posto di lavoro espresso in €/min. (Costo postazione). Questo costo comprende, oltre al costo unitario della macchina operatrice, tutti i costi relativi al posto di lavoro: ammortamenti, forza motrice, materiali di consumo, attrezzature, retribuzioni dell'operatore, manutenzione, quota parte delle spese generali del centro di costo, ecc
$t_p$ = tempi passivi in min. per lo scarico di un elemento finito e il montaggio sulla macchina di un altro elemento greggio, per appostamenti dell'utensile e ritorni rapidi, per soste diverse. Questi tempi non tengono conto del tempo di cambio inserto usurato, ma fanno riferimento a sostituzione dell'inserto con uno di tipo diverso
$t_l$ = tempo effettivo di lavorazione dell'inserto espressa in min. comprensivo di extra corsa e di movimenti in rapido (tempi attivi)
$t_{l, tot}$ = tempi attivi totali relativi alla lavorazione di un pezzo in min.
$t_{cu}$ = tempo di arresto della macchina in min. per il cambio di un inserto usurato con un altro nuovo dello stesso tipo
$t_s$ = tempi di sostituzione inserto diviso il numero di pezzi che posso lavorare con quell'inserto espressa in min./pezzo
$t_{set-up}$ = tempo di set-up macchina per un lotto espressa in min.
$C_{ut}$ = costo dell'inserto espresso in €
$T$ = durata dell'inserto o del tagliente attivo dell'utensile espressa in min.
$T_c$ = durata dell'inserto che viene fatto lavorare a velocità consigliata espressa in min.
$T_e$ = durata economica espressa in min.
$t_T$ = tempo totale espressa in min.
$N_t$ = Numero di pezzi che posso fare nell'intervallo "T"
$V_1$ = Velocità specifica di taglio espressa in m/min. (costante di Taylor = velocità tale

per cui il tagliente attivo dell' inserto ha una durata $T=1$ min.)
$\alpha$ = Coefficiente di durata, funzione della coppia materiale dell' inserto – materiale del pezzo da lavorare. In questo testo si fa riferimento al valore di $\alpha$ fornito da Taylor, che per lavorazioni con utensili in acciaio rapido su acciaio vale: $\alpha=0.122$
$L$ = lunghezza del pezzo da lavorare (Corsa) espressa in mm.
$D$ = diametro della superficie lavorata espresso in mm
$a$ = velocità di avanzamento espresso in mm/giro
$n$ = numero di giri del pezzo in lavorazione espresso in giri/min.
$v$ = Velocità di taglio espressa in m/min.
$v_e$ = Velocità di taglio economica espressa in m/min.
$v_p$ = Velocità di taglio di massima produzione espressa in m/min.
$v_{c, \min}$ = Velocità minima di taglio consigliata dal costruttore dell'utensile in m/min.
$v_{c, \max}$ = Velocità massima di taglio consigliata dal costruttore dell'utensile in m/min.
$P_r$ = profitto "utile" espresso in €/min.
$R_v$ = Ricavi in €
$n_L$ = numerosità del lotto

### 3.3 Modello analitico del costo di una lavorazione per asportazione di truciolo

Per affrontare il problema è necessario partire dalla seguente espressione dei costi totali che sarà discussa in un successivo articolo.

$$C_T = [C_p \cdot t_p] + \left[ C_p \cdot \left( \frac{L \cdot \pi \cdot D}{a \cdot 1000 \cdot V_1} \right) \right] \cdot (T)^\alpha + \left[ (C_p \cdot t_{cu} + C_{ut}) \cdot \left( \frac{L \cdot \pi \cdot D}{a \cdot 1000 \cdot V_1} \right) \right] \cdot (T)^{\alpha-1}$$

con i simboli elencati in tabella 1.

Tra le varie voci dei costi parziali compare il termine relativo al tempo di set-up necessario per tenere conto del fatto che, ogni volta che si prepara una macchina a controllo numerico per un nuovo lotto, devono essere ripetute operazioni quali azzeramento, controllo della macchina, immissione del "part program", prove, ecc.

L'espressione si riferisce ad una *singola* lavorazione, mentre nel caso in esame se ne devono considerare 15, quindi l'espressione si modifica inserendo delle sommatorie per

ciascuno dei termini, ad eccezione del tempo di set-up, che naturalmente compare una sola volta per l'intero lotto.

Le voci che compaiono nella nuova espressione sono identificate da un pedice "k", per indicare che queste non sono voce generale ma si riferiscono all'utensile k-esimo.

Nella nuova forma non si fa più riferimento alla durata del tagliente, ma al numero di pezzi che l'utensile k-esimo può eseguire.

Si calcola quindi, la derivata del costo totale rispetto al numero di pezzi lavorati  $N_{t,k}$  rispetto al quale si andrà a determinare la condizione di minimo costo delle singole lavorazioni. A fronte di questo risultato otterremo il valore di  $N_{t,k}$  da reimmettere nel foglio di calcolo per determinare i parametri di velocità di taglio che soddisfa il criterio del minimo costo.

Il valore del costo totale delle lavorazioni eseguite su un singolo pezzo può essere calcolato mediante la seguente espressione:

$$C_{T\_x\_pezzo} = C_p \frac{t_{set-up}}{n_L} + C_p \sum_{k=1}^{15} t_{l,k} + C_p \sum_{k=1}^{15} t_{p,k} + C_p \sum_{k=1}^{15} \frac{t_{cu,k}}{N_{t,k}} + \sum_{k=1}^{15} \frac{C_{ut,k}}{N_{t,k}}$$

Analizzando i parametri da immettere nella relazione sopra esposta, si nota che il tempo attivo in una lavorazione di tornitura può essere espresso come:

$$t_l = \frac{L}{a \cdot n}$$

Ma:

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \Rightarrow n = \frac{v \cdot 1000}{\pi \cdot D}$$

Da cui sostituendo nell'espressione di "t<sub>a</sub>" otteniamo:

$$t_l = \frac{\pi \cdot D \cdot L}{a \cdot v \cdot 1000}$$



Sostituendo il valore della velocità ottenuto in base alla legge di Taylor ( $V \cdot T^n = V_1$ ) si ottiene:

$$t_l = \frac{\pi \cdot D \cdot L \cdot T^a}{a \cdot V_1 \cdot 1000}$$

Per adattare l'espressione ottenuta al caso in questione si deve esplicitare nell'espressione di " $t_l$ " il parametro " $N_t$ " di pezzi lavorati nell'intervallo " $T$ " di durata del tagliente attivo dell'utensile k-esimo:

$$N_{t,k} = \frac{T_k}{t_{l,k}} \Rightarrow T_k = N_{t,k} \cdot t_{l,k}$$

Sostituendo l'espressione di " $T_k$ " in " $t_{l,k}$ " si ottiene:

$$t_{l,k} = \left[ \frac{\pi \cdot D \cdot L \cdot (N_{t,k})^a \cdot t_{l,k}^a}{a \cdot V_1 \cdot 1000} \right] \Rightarrow (t_{l,k})^{(1-a)} = \left[ \frac{\pi \cdot D \cdot L \cdot (N_{t,k})^a}{a \cdot V_1 \cdot 1000} \right]$$

Da cui:

$$t_{l,k} = \left[ \frac{\pi \cdot D \cdot L \cdot (N_{t,k})^a}{a \cdot V_1 \cdot 1000} \right]^{\left(\frac{1}{1-a}\right)}$$

Sostituendo tale espressione in quella del costo totale delle lavorazioni per fare un pezzo otteniamo alla fine:

$$C_{T-x-pezzo} = C_p \cdot \left\{ \frac{t_{set-up}}{n_L} + \sum_{k=1}^{15} \left[ \frac{\pi \cdot D \cdot L \cdot (N_{t,k})^a}{a \cdot V_1 \cdot 1000} \right]^{\left(\frac{1}{1-a}\right)} + \sum_{k=1}^{15} t_{p,k} + \sum_{k=1}^{15} \frac{t_{s,k}}{N_{t,k}} \right\} + \sum_{k=1}^{15} \frac{C_{ut,k}}{N_{t,k}}$$

Da cui si può ricavare il costo totale della produzione del lotto in esame calcolando:

$$C_T = n_L \cdot C_{T\_x\_pezzo}$$

Per ottimizzare il costo si impone al solito la condizione:

$$\frac{dC_{T\_x\_pezzo}}{dN_t} = 0$$

Sviluppando i calcoli si ottiene:

$$C_p \cdot \left[ \frac{\pi \cdot D \cdot L}{a \cdot V_1 \cdot 1000} \right]^{\left( \frac{1}{1-\alpha} \right)} \cdot \left( \frac{\alpha}{1-\alpha} \right) \cdot N_t^{\left( \frac{2\alpha-1}{1-\alpha} \right)} - \frac{C_{ut}}{(N_t)^2} - \frac{C_p \cdot t_{cu}}{(N_t)^2} = 0$$

E' possibile rappresentare in un grafico l'andamento di tale espressione per effettuare analisi qualitative che portano a scegliere il valore di  $N_t$  che minimizza il costo.

Il valore scelto sarà poi necessario per determinare i valori di velocità di taglio che dovranno essere impostate sul centro di lavoro per minimizzare il costo totale unitario  $C_T$ .

## 4. Descrizione del foglio di calcolo

Viene descritta ora la struttura di un foglio di calcolo che utilizza le formule appositamente sviluppate nel capitolo precedente e che permette di realizzare grafici utili per l'analisi.

Il foglio di calcolo contiene tre pagine:

1. il foglio "CALCOLI PIAGGIO", nel quale vengono calcolati, in base ai termini di *input*, gli *output* fondamentali di velocità di taglio, costo totale unitario (a pezzo) e costo totale a lotto, in relazione ai valori impostati degli  $N_{t,k}$ , cioè del numero di pezzi che può lavorare ciascun utensile;
2. il foglio "GRAFICI PIAGGIO", nel quale vengono riportati gli andamenti del costo unitario e totale del lotto in funzione della numerosità del lotto stesso, e gli andamenti delle derivate del costo unitario rispetto alla variabile  $N_{t,k}$ , dai quali si ricavano i valori degli  $N_{t,k}$  ottimali da immettere manualmente nel foglio CALCOLI PIAGGIO;

3. il foglio “CALCOLI PIAGGIO(2)”, nel quale vengono calcolati fondamentalmente i valori degli  $N_{t,k}$  in relazione alle velocità di taglio, in questo caso impostate a priori, come abbiamo accennato in precedenza, e il costo unitario e quello totale a lotto.

Come si capisce, i due fogli CALCOLI corrispondono ai due approcci di analisi descritti nell'introduzione al problema. In particolare, il foglio CALCOLI PIAGGIO(2) permette ancora di valutare i costi delle scelte, ma non esegue una vera e propria ottimizzazione, ma sulla base di valori orientativamente scelti dall'operatore.

I simboli utilizzati nel foglio sono elencati in Tabella 2.

**Tabella 2 I dati che è necessario conoscere e inserire nel foglio di calcolo**

<b>Lista dei simboli</b>
$L$ = Corsa di lavorazione espressa in millimetri
$a$ = Velocità di avanzamento in mm/min.
$D$ = Diametro del pezzo da lavorare in mm
$N_{t,k}$ = n° pezzi lavorati dall'inserto k-esimo
$V_1$ = Costante di Taylor per l'utensile k-esimo
$\alpha$ = Coefficiente di durata
$T$ = Tempo di durata dell'inserto k-esimo che viene fatto lavorare a velocità consigliata in min.
$v_{c, \min}$ = Velocità minima di taglio consigliata dal costruttore dell'utensile in m/min.
$v_{c, \max}$ = Velocità massima di taglio consigliata dal costruttore dell'utensile in m/min.
$C_{ut,k}$ = Costo inserto k-esimo in €
$T_{cu,k}$ = Tempo di sostituzione inserto in min.
$C_p$ = Costo postazione in €/min.
$t_{\text{set-up}}$ = Tempo di set-up macchina in min.
$t_p$ = Tempi passivi
$n_L$ = numerosità del lotto
$N_t$ = massimo comun divisore tra il numero dei pezzi lavorati da ciascun utensile
$f_k$ = Fattore moltiplicativo che permette di rendere multipli il numero di pezzi realizzati rispetto al $N_{t,k}$ :
$N_{t,k} = f_k \cdot N_t$

## 4.1 Foglio CALCOLI PIAGGIO

Nel foglio CALCOLI PIAGGIO (Figura 0-1) si individuano quattro aree principali che contengono i dati: in alto a sinistra i valori di *input* (in arancione) e a destra quelli di *output* (in blu); in basso a sinistra i valori relativi ai tempi passivi e al centro tempi e costi calcolati.

INSERIRE I DATI IN ARANCIONE											
Dati geometrici			Dati utensile								
Ut.le	C [mm]	D [mm]	a [mm/g]	C <sub>u,k</sub> [€]	t <sub>s,k</sub> [min]	V <sub>1</sub> [m/min]	α	T <sub>c</sub> [min]	V <sub>C,min</sub> [m/min]	V <sub>C,max</sub> [m/min]	f <sub>k</sub>
1	150	50	0.50	3	5	500	0.140	30	140	180	2
2	150	50	0.50	3	5	500	0.140	30	140	180	2
3	150	50	0.50	3	5	500	0.140	30	140	180	2
4	150	50	0.50	3	5	500	0.140	30	140	180	2
5	150	50	0.50	3	5	500	0.140	30	140	180	2
6	100	50	0.35	2	5	650	0.140	35	160	200	3
7	100	50	0.35	2	5	650	0.140	35	160	200	3
8	100	50	0.35	2	5	650	0.140	35	160	200	3
9	100	50	0.35	2	5	650	0.140	35	160	200	3
10	100	50	0.35	2	5	650	0.140	35	160	200	3
11	50	50	0.20	1.5	5	750	0.140	40	180	250	4
12	50	50	0.20	1.5	5	750	0.140	40	180	250	4
13	50	50	0.20	1.5	5	750	0.140	40	180	250	4
14	50	50	0.20	1.5	5	750	0.140	40	180	250	4
15	50	50	0.20	1.5	5	750	0.140	40	180	250	4

I VALORI CALCOLATI SONO IN BLU											
Dati di lavorazione relativi ad un Albero Motore in acciaio legato, bonificato per R=1000-1500 N/mm <sup>2</sup>											
N <sub>u,k</sub>	t <sub>u,k</sub> [min/pezzo]	T [min]	v [m/min]	verifica su v	n <sub>u,k</sub>	C <sub>u,k</sub> /N <sub>u,k</sub>	t <sub>u,k</sub> /N <sub>u,k</sub>	C <sub>u,k</sub> /N <sub>u,k</sub>	t <sub>u,k</sub> /N <sub>u,k</sub>	C <sub>u,k</sub> /N <sub>u,k</sub>	t <sub>u,k</sub> /N <sub>u,k</sub>
20	0.254	60	185	NO	50	0.150	0.250	150.00			
20	0.254	60	185	NO	50	0.150	0.250	150.00			
20	0.254	60	185	NO	50	0.150	0.250	150.00			
20	0.254	60	185	NO	50	0.150	0.250	150.00			
20	0.254	60	185	NO	50	0.150	0.250	150.00			
30	0.197	60	228	NO	34	0.067	0.167	66.67			
30	0.197	60	228	NO	34	0.067	0.167	66.67			
30	0.197	60	228	NO	34	0.067	0.167	66.67			
30	0.197	60	228	NO	34	0.067	0.167	66.67			
30	0.197	60	228	NO	34	0.067	0.167	66.67			
40	0.156	60	252	NO	25	0.038	0.125	37.50			
40	0.156	60	252	NO	25	0.038	0.125	37.50			
40	0.156	60	252	NO	25	0.038	0.125	37.50			
40	0.156	60	252	NO	25	0.038	0.125	37.50			
40	0.156	60	252	NO	25	0.038	0.125	37.50			
Tot	3.036					1.271	2.708	1271			

Tempi Macchina Passivi		
rif.to	Imputazione	t <sub>p</sub> [min]
1	Ut.le 1-5 grosso	1.000
2	Ut.le 5-10 semilavora	1.000
3	Ut.le 10-15 finitura	1.000
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10	Carico e Scarico	0.500
Tot		3.500

COSTO TOTALE(A PEZZO)						
C <sub>p</sub> [€/min]	C <sub>u</sub> [€/pezzo]	t <sub>u,k</sub> [min]	t <sub>u,k</sub> [min/pezzo]	t <sub>p</sub> [min/pezzo]	t <sub>tot</sub> [min/pezzo]	C <sub>tot</sub> [€/pezzo]
1.400	1271	360	3.036	3.500	2.708	14.717

n <sub>u</sub>	costo totale
1000	14717

Figura 0-1 Visione d'insieme del foglio CALCOLI PIAGGIO. In senso orario: le aree di *input*, *output*, tempi e costi e tempi passivi

INSERIRE I DATI IN ARANCIONE											
Dati geometrici			Dati utensile								
Ut.le	C [mm]	D [mm]	a [mm/g]	C <sub>u,k</sub> [€]	t <sub>s,k</sub> [min]	V <sub>1</sub> [m/min]	α	T <sub>c</sub> [min]	V <sub>C,min</sub> [m/min]	V <sub>C,max</sub> [m/min]	f <sub>k</sub>
1	150	50	0.50	3	5	500	0.140	30	140	180	2
2	150	50	0.50	3	5	500	0.140	30	140	180	2
3	150	50	0.50	3	5	500	0.140	30	140	180	2
4	150	50	0.50	3	5	500	0.140	30	140	180	2
5	150	50	0.50	3	5	500	0.140	30	140	180	2
6	100	50	0.35	2	5	650	0.140	35	160	200	3
7	100	50	0.35	2	5	650	0.140	35	160	200	3
8	100	50	0.35	2	5	650	0.140	35	160	200	3
9	100	50	0.35	2	5	650	0.140	35	160	200	3
10	100	50	0.35	2	5	650	0.140	35	160	200	3
11	50	50	0.20	1.5	5	750	0.140	40	180	250	4
12	50	50	0.20	1.5	5	750	0.140	40	180	250	4
13	50	50	0.20	1.5	5	750	0.140	40	180	250	4
14	50	50	0.20	1.5	5	750	0.140	40	180	250	4
15	50	50	0.20	1.5	5	750	0.140	40	180	250	4

Figura 0-2 Dettaglio con i dati di *input* del foglio CALCOLI PIAGGIO. Il significato delle grandezze nelle colonne per i 15 utensili (sulle righe) si può evincere dalla Tabella 2

In

Figura 0-2 si vede la suddivisione dei dati di *input* tra

- dati geometrici del pezzo per la specifica lavorazione in cui è utilizzato l'utensile
- dati relativi all'utensile, principalmente la costante di Taylor ed il coefficiente di durata.

Tempi Macchina Passivi		
rif.to	Imputazione	$t_p$ [min]
1	Ut.le 1-5 sgrasso	1.000
2	Ut.le 5-10 semifin.ra	1.000
3	Ut.le 10-15 finitura	1.000
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10	Carico e Scarico	0.500
Tot		3.500

**Figura 0-3 Area per l'inserimento dei tempi passivi.**

Come è possibile notare in Figura 0-3, nel caso dei tempi passivi per semplicità i valori sono stati raggruppati per “famiglie” di utensili, dato che i tempi di cambio inserto in genere non variano molto tra utensili della stessa famiglia, e nell'esempio trattato neppure tra famiglie. NB: qui si intende il cambio inserto tra una sottofase e l'altra, non il rimpiazzo per avvenuta usura.

<b>N<sub>t</sub></b>		<b>10</b>							
<b>I VALORI CALCOLATI SONO IN BLU</b>									
<b>Dati di lavorazione relativi ad un Albero Motore in acciaio legato, bonificato per R=1000-1500 N/mm<sup>2</sup></b>									
Ut.le	N <sub>t,k</sub>	t <sub>a,k</sub> [min/pz]	T [min.]	v [m/min]	verifica su v	n <sub>s,k</sub>	C <sub>u,k</sub> /N <sub>t,k</sub>	t <sub>s,k</sub> /N <sub>t,k</sub>	C <sub>u,k,tot</sub> [€/n <sub>t</sub> ]
1	20	0.254	60	185	NO	50	0.150	0.250	150.00
2	20	0.254	60	185	NO	50	0.150	0.250	150.00
3	20	0.254	60	185	NO	50	0.150	0.250	150.00
4	20	0.254	60	185	NO	50	0.150	0.250	150.00
5	20	0.254	60	185	NO	50	0.150	0.250	150.00
6	30	0.197	60	228	NO	34	0.067	0.167	66.67
7	30	0.197	60	228	NO	34	0.067	0.167	66.67
8	30	0.197	60	228	NO	34	0.067	0.167	66.67
9	30	0.197	60	228	NO	34	0.067	0.167	66.67
10	30	0.197	60	228	NO	34	0.067	0.167	66.67
11	40	0.156	60	252	NO	25	0.038	0.125	37.50
12	40	0.156	60	252	NO	25	0.038	0.125	37.50
13	40	0.156	60	252	NO	25	0.038	0.125	37.50
14	40	0.156	60	252	NO	25	0.038	0.125	37.50
15	40	0.156	60	252	NO	25	0.038	0.125	37.50
Tot		3.036					1.271	2.708	1271

**Figura 0-4 Dettaglio con i dati di output del foglio CALCOLI PIAGGIO. Il significato delle grandezze nelle colonne per i 15 utensili (sulle righe) si può evincere dalla Tabella 2**

Si nota che in alto compare come *input* il valore di N<sub>t,k</sub>, massimo comun divisore scelto in base agli andamenti del foglio GRAFICI PIAGGIO.

Si può notare che è stata prevista una colonna (dati in verde) per la verifica dei valori ottenuti di velocità di taglio, che devono rientrare nell'intervallo di accettabilità dello specifico utensile.

Le ultime tre colonne servono per calcoli intermedi.

In aggiunta (sesta colonna) viene calcolato il numero di inserti necessario per la lavorazione di un intero lotto, dato dal rapporto tra numerosità del lotto e numero di pezzi lavorato da un singolo inserto.

Tempi e costi unitari e per l'intero lotto sono calcolati nell'apposita area in Figura 0-5.

I valori totali (sommatorie) sono evidenziati in giallo.

COSTO TOTALE(A PEZZO)								
$C_p$ [€/min]	$C_u$ [€/pz]	$t_{s,u}$ [min]	$t_{a,tot}$ [min/pz]	$t_p$ [min/pz]	$t_{sost}$ [min/pz]	$C_{tot}$ [€/pz]	$n_L$	costo totale
1.400	1.271	360	3.036	3.500	2.708	14.717	1000	14717

Figura 0-5 Dettaglio con i tempi e i costi calcolati nel foglio CALCOLI PIAGGIO, come da Tabella 2

## 4.2 Foglio GRAFICI PIAGGIO

Nel foglio GRAFICI PIAGGIO, gli andamenti dei costi unitari in funzione del numero di pezzi del lotto lavorati prima del fermo macchina e delle relative derivate sono collocati rispettivamente a sinistra e a destra. In Figura 0-6 vengono mostrati i diversi grafici, visibili più in dettaglio in Figura 0-7 e in Figura 0-8.

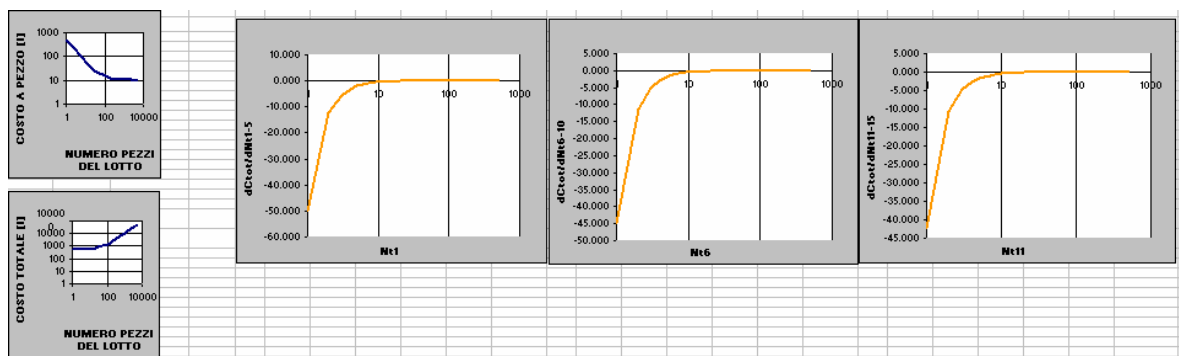
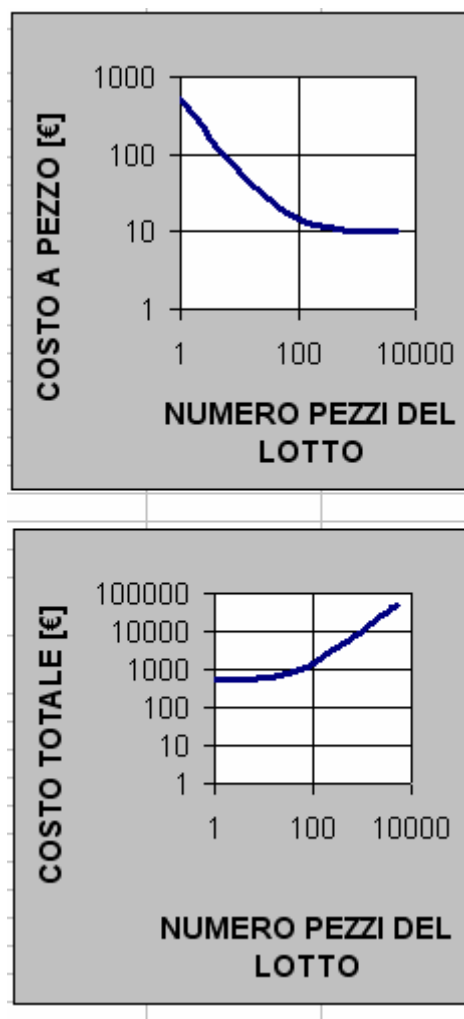


Figura 0-6 Visione d'insieme del foglio GRAFICI PIAGGIO



**Figura 0-7 Area con l'andamento dei costi in funzione della numerosità del lotto nel foglio GRAFICI PIAGGIO**

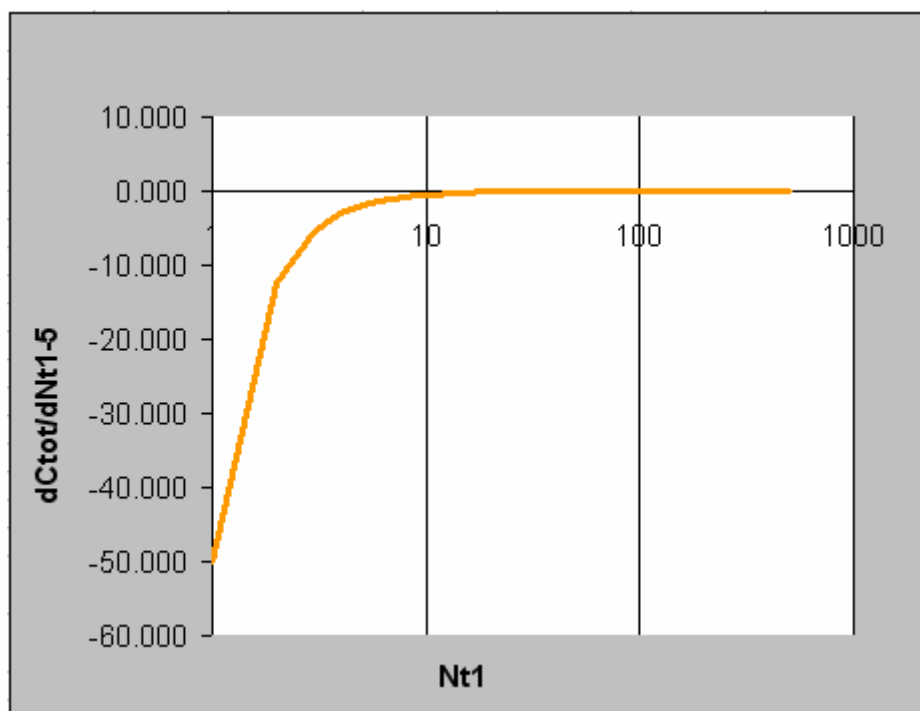
Come si evince dai grafici in Figura 0-7, si ottengono andamenti dei costi giustamente contrapposti, anche a verifica della correttezza delle espressioni utilizzate per il calcolo.

Come si può notare dalla Figura 0-6 e più in dettaglio dalla Figura 0-7 e dalla Figura 0-8, i valori di *input* sono ancora in arancione, in questo caso solo  $n_L$ , numerosità del lotto, mentre i valori in blu ed in nero grassetto si riferiscono rispettivamente al costo unitario ed a quello totale del lotto.

Nelle righe superiormente ai grafici (di cui è visualizzata solo la prima) in Figura 0-7 e in Figura 0-8, vengono calcolati i valori rappresentati nei grafici stessi.

Il calcolo delle derivate dei costi (Figura 0-8) è ottenuto sommando i contributi degli utensili raggruppati in famiglie. Nell'intervallo per chiarezza visiva si riporta solo la zona relativa ai primi 5 utensili.





**Figura 0-8 Andamento della derivata dei costi in funzione della numero dei pezzi lavorati per la prima delle tre famiglie di utensili considerati nel foglio GRAFICI PIAGGIO.**

I valori degli  $N_{t,k}$  relativi agli utensili (in nero) sono rappresentati una volta sola (le altre colonne sono nascoste), inoltre, sempre per questioni di snellezza del foglio, viene visualizzato soltanto il primo valore per ogni colonna.

Nelle altre colonne vengono riportati i valori delle derivate singole ed infine di quella totale (la somma delle prime).

Il grafico di Figura 0-8 riporta l'andamento della derivata totale; dall'analisi dello stesso si evince che oltre il valore di  $N_t$  pari a 10 circa la derivata tende ad annullarsi

Questo comportamento si verifica per tutti i gruppi di utensili, perché possiedono caratteristiche simili.

Risulta dunque pari a 10 il valore del massimo comun divisore cioè il numero di pezzi che conviene lavorare prima di ogni fermo macchina.

Tale valore si deve poi immettere nel foglio CALCOLI PIAGGIO per determinare gli altri parametri necessari alla produzione.

### 4.3 Foglio CALCOLI PIAGGIO(2)

Nel foglio CALCOLI PIAGGIO(2) i raggruppamenti di dati sono analoghi al foglio CALCOLI PIAGGIO come mostrato in Figura 0-9.

INSERIRE I DATI IN ARANCIONE									
Dati geometrici			Dati utensile						
Ut.le	C [mm]	D [mm]	a [mm/g]	C <sub>ul</sub> [€]	t <sub>s,k</sub> min	T <sub>min</sub> [min.]	V <sub>max</sub> [m/min]	f <sub>s</sub>	
1	150	50	0,5	3	5	30	164	2	
2	150	50	0,5	3	5	30	164	2	
3	150	50	0,5	3	5	30	164	2	
4	150	50	0,5	3	5	30	164	2	
5	150	50	0,5	3	5	30	164	2	
6	100	50	0,35	2	5	35	197	3	
7	100	50	0,35	2	5	35	197	3	
8	100	50	0,35	2	5	35	197	3	
9	100	50	0,35	2	5	35	197	3	
10	100	50	0,35	2	5	35	197	3	
11	50	50	0,2	1,5	5	40	216	4	
12	50	50	0,2	1,5	5	40	216	4	
13	50	50	0,2	1,5	5	40	216	4	
14	50	50	0,2	1,5	5	40	216	4	
15	50	50	0,2	1,5	5	40	216	4	

I VALORI CALCOLATI SONO IN BLU									
Dati di lavorazione relativi ad un Albero Motore in acciaio legato, per R=1000-1500 N/mm <sup>2</sup>								bonificato	
N <sub>ik</sub>	verifica su N <sub>ik</sub>	N <sub>ik</sub>	t <sub>ik,el</sub> [min/ut]	verifica su t <sub>ik,el</sub>	n <sub>ik</sub>	C <sub>ul</sub> /N <sub>ik</sub>	t <sub>tot</sub> /N <sub>ik</sub>	dC <sub>ul</sub> /dv (v=vmax)	
100	==>OK!	104.39	0.29	==>OK!	10	0.029	0.048	0.0015	
100	==>OK!	104.39	0.29	==>OK!	10	0.029	0.048	0.0015	
100	==>OK!	104.39	0.29	==>OK!	10	0.029	0.048	0.0015	
100	==>OK!	104.39	0.29	==>OK!	10	0.029	0.048	0.0015	
100	==>OK!	104.39	0.29	==>OK!	10	0.029	0.048	0.0015	
150	==>OK!	153.25	0.23	==>OK!	7	0.013	0.033	0.0012	
150	==>OK!	153.25	0.23	==>OK!	7	0.013	0.033	0.0012	
150	==>OK!	153.25	0.23	==>OK!	7	0.013	0.033	0.0012	
150	==>OK!	153.25	0.23	==>OK!	7	0.013	0.033	0.0012	
150	==>OK!	153.25	0.23	==>OK!	7	0.013	0.033	0.0012	
200	==>OK!	220.00	0.18	==>OK!	5	0.007	0.023	0.0010	
200	==>OK!	220.00	0.18	==>OK!	5	0.007	0.023	0.0010	
200	==>OK!	220.00	0.18	==>OK!	5	0.007	0.023	0.0010	
200	==>OK!	220.00	0.18	==>OK!	5	0.007	0.023	0.0010	
200	==>OK!	220.00	0.18	==>OK!	5	0.007	0.023	0.0010	
Tot		3.488				0.243	0.516		

Tempi Macchina Passivi		
rif.to	Imputazione	t <sub>p</sub> [min]
1	Ut.le 1-5 sgrosso	1.000
2	Ut.le 5-10 semifin.ra	1.000
3	Ut.le 10-15 finitura	1.000
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10	Carico e Scarico	0.500
Tot		3.500

COSTO TOTALE(A PEZZO)						
C <sub>p</sub> [€/min.]	C <sub>u</sub> [€/pz]	t <sub>s,μ</sub> [min]	t <sub>a</sub> [min/pz]	t <sub>p</sub> [min/pz]	t <sub>tot</sub> [min/pz]	C <sub>tot</sub> [€/pezzo]
1.400	0.243	360	3.488	3.500	0.516	11.253

n <sub>L</sub>	costo totale
1000	11253

Figura 0-9 Visione d'insieme del foglio CALCOLI PIAGGIO(2), simile al foglio CALCOLI PIAGGIO di Figura 0-1

INSERIRE I DATI IN ARANCIONE								
Dati geometrici			Dati utensile					
Ut.le	C [mm]	D [mm]	a [mm/g]	$C_{u,k}$ [€]	$t_{s,k}$ min	$T_{min}$ [min.]	$V_{max}$ [m/min]	$f_k$
1	150	50	0.5	3	5	30	164	2
2	150	50	0.5	3	5	30	164	2
3	150	50	0.5	3	5	30	164	2
4	150	50	0.5	3	5	30	164	2
5	150	50	0.5	3	5	30	164	2
6	100	50	0.35	2	5	35	197	3
7	100	50	0.35	2	5	35	197	3
8	100	50	0.35	2	5	35	197	3
9	100	50	0.35	2	5	35	197	3
10	100	50	0.35	2	5	35	197	3
11	50	50	0.2	1.5	5	40	216	4
12	50	50	0.2	1.5	5	40	216	4
13	50	50	0.2	1.5	5	40	216	4
14	50	50	0.2	1.5	5	40	216	4
15	50	50	0.2	1.5	5	40	216	4

**Figura 0-10** Dettaglio con i dati di *input* del foglio CALCOLI PIAGGIO(2). Il significato delle grandezze nelle colonne per i 15 utensili (sulle righe) si può evincere dalla Tabella 2

In questa variante, si nota che, rispetto al foglio CALCOLI PIAGGIO, non figura una gamma di velocità di taglio fornita dal costruttore di utensili, ma un dato di riferimento massimo fissato dal produttore (Piaggio), dettato dall'esperienza aziendale. Inoltre non compaiono più i valori della costante di Taylor e del coefficiente di durata. I valori dei tempi passivi rimangono gli stessi di Figura 0-3.

$N_t$		50							
I VALORI CALCOLATI SONO IN BLU									
Dati di lavorazione relativi ad un Albero Motore in acciaio legato, bonificato per R=1000-1500 N/mm2									
Ut.le	$N_{t,k}$	verifica su $N_{t,k}$	$N_{t,k}$	$t_{k,tot}$ [min/ut]	verifica su $t_{k,tot}$	$n_{s,k}$	$C_{uk}/N_{t,k}$	$t_{sost}/N_{t,k}$	$dC_{tot}/dv$ ( $v=v_{max}$ )
1	100	==> OK!	104.39	0.29	==> OK	10	0.029	0.048	0.0015
2	100	==> OK!	104.39	0.29	==> OK	10	0.029	0.048	0.0015
3	100	==> OK!	104.39	0.29	==> OK	10	0.029	0.048	0.0015
4	100	==> OK!	104.39	0.29	==> OK	10	0.029	0.048	0.0015
5	100	==> OK!	104.39	0.29	==> OK	10	0.029	0.048	0.0015
6	150	==> OK!	153.25	0.23	==> OK	7	0.013	0.033	0.0012
7	150	==> OK!	153.25	0.23	==> OK	7	0.013	0.033	0.0012
8	150	==> OK!	153.25	0.23	==> OK	7	0.013	0.033	0.0012
9	150	==> OK!	153.25	0.23	==> OK	7	0.013	0.033	0.0012
10	150	==> OK!	153.25	0.23	==> OK	7	0.013	0.033	0.0012
11	200	==> OK!	220.00	0.18	==> OK	5	0.007	0.023	0.0010
12	200	==> OK!	220.00	0.18	==> OK	5	0.007	0.023	0.0010
13	200	==> OK!	220.00	0.18	==> OK	5	0.007	0.023	0.0010
14	200	==> OK!	220.00	0.18	==> OK	5	0.007	0.023	0.0010
15	200	==> OK!	220.00	0.18	==> OK	5	0.007	0.023	0.0010
Tot				3.488			0.243	0.516	

Figura 0-11 Dettaglio con i dati di *output* del foglio CALCOLI PIAGGIO(2). Il significato delle grandezze nelle colonne per i 15 utensili (sulle righe) si può evincere dalla Tabella 2

Al solito compare il valore di  $N_t$ , ma stavolta non è ricavabile da grafici in quanto non disponendo di dati relativi alla costante di Taylor ed al coefficiente di durata, non sono calcolabili le derivate dei costi unitari al variare di  $N_{t,k}$ .

Le due colonne (in verde) servono per la verifica dei valori degli  $N_{t,k}$  “di prova”, multipli di  $N_t$ , i quali devono risultare minori di quelli di riferimento (calcolati in base alle velocità di taglio imposte), e di verifica sui valori dei tempi attivi, che ovviamente devono risultare minori della durata di riferimento dell’inserito.

Infine rimane la zona relativa ai costi (Figura 0-12), la quale strutturalmente non presenta differenze rispetto al caso precedente:

COSTO TOTALE(A PEZZO)								
$C_p$ [€/min.]	$C_u$ [€/pz]	$t_{s,u}$ [min]	$t_a$ [min/pz]	$t_p$ [min/pz]	$t_{sost}$ [min/pz]	$C_{tot}$ [€/pezzo]	$n_L$	costo totale
1.400	0.243	360	3.488	3.500	0.516	11.253	1000	11253

Figura 0-12 Dettaglio con i tempi e i costi calcolati nel foglio CALCOLI PIAGGIO, come da Tabella 2

#### 4.4 Uso del foglio di calcolo

E' stato descritto un foglio di calcolo per ottimizzare il costo dovuto al numero dei fermi macchina per la sostituzione degli utensili usurati nel magazzino della macchina. Per l'adozione in ambito aziendale di un simile strumento è opportuno tenere conto di ulteriori aspetti che ne facilitino l'accettazione da parte degli utilizzatori

- la struttura del foglio dovrebbe risultare gradevole al tecnico od all'operatore, ad esempio localizzando facilmente e rapidamente i dati che interessano, tra i numerosi presenti;
- un singolo foglio si dovrebbe inoltre adattare a risolvere non un solo processo produttivo, ma una gamma di lavorazioni.

## 5. Risultati

Dall'analisi dei grafici ottenuti è emerso che oltre un certo valore di  $N_{t,k}$ , la derivata del costo unitario tende ad annullarsi, quindi oltre tale valore, ogni scelta di  $N_{t,k}$  rispetta il criterio del minimo costo, posto che la velocità di taglio sia compresa nell'intervallo consigliato dal costruttore degli utensili.

Sarebbe naturale attendersi un aumento dei costi all'aumentare dei fermi macchina poiché i parametri di velocità di taglio e durata dell'inserto sono intercorrelati. Ad esempio: un aumento della velocità di taglio è legato a una diminuzione della durata dell'inserto e quindi a un maggior numero di fermi macchina.

Nel caso in esame, a causa del basso costo della postazione, non si ha un effetto apprezzabile sui costi della lavorazione al variare del numero dei fermi macchina.

## 6. Conclusioni

E' stato presentato un problema di ottimizzazione legato alla produzione: l'ottimizzazione delle sostituzioni nel magazzino utensili in lavorazioni per asportazione di truciolo. Pur nella semplicità del caso esaminato, risulta evidente l'elevato numero di variabili in gioco che richiede lo sviluppo di un metodo *ad hoc*, come ad esempio quello descritto, per determinare una soluzione economicamente conveniente o per dimostrarne l'economicità.

Il modello analitico proposto, attraverso la ricerca esaustiva di soluzioni consente di ricavare una soluzione ottima, affinabile a piacere in base all'intervallo di scansione impostato su foglio di calcolo. Lo studio teorico delle derivate delle funzioni obiettivo (es. costo, tempo, profitto) dimostra che ciascuna variabile da ottimizzare presenta un minimo/massimo assoluto che può essere determinato con il metodo numerico esaustivo.

Il mix di parametri di costo relativo alla specifica realtà aziendale permette di operare non solo delle scelte economicamente convenienti, ma consente anche considerazioni più ampie sulle politiche da adottare in produzione, attraverso l'analisi degli andamenti dei grafici, come è stato mostrato nell'esempio considerato.

## Ringraziamenti

Progetto sviluppato nell'ambito dell'insegnamento di Studi di Fabbricazione del Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Meccanica anno accademico 2007-08, presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Pisa, con il supporto della Società Piaggio & C. S.p.A. (Sig. Raffaello Fontanini). Gli autori tengono ad esprimere i più sentiti ringraziamenti agli ingegneri del *Manufacturing* Guido Batoni, Maurizio Mancuso e al Direttore Carlo Coppola che hanno portato l'esperienza di una grande azienda metalmeccanica.

## Bibliografia

M. Santochi, F. Giusti: Tecnologia meccanica e studi di fabbricazione, 2° ed., 2000, Casa Editrice Ambrosiana Milano, pp. 674, ISBN 88-408-1028-5.

G. F. Micheletti: Tecnologia Meccanica, Vol. I e II, 2° ed., 1979, Edizioni UTET, pp. XXIV-1044, ISBN: 8802034141.

A. Bugini, R. Pacagnella, C. Giardini, G. Restelli, Tecnologia meccanica 2, Lavorazioni per asportazione di truciolo, 1996, Citta studi, pp. 500, ISBN: 9788825171297.

F. Gabrielli, R. Ippolito, F. Micari: Analisi e tecnologie delle lavorazioni meccaniche, 2008, McGraw-Hill, pp. 465, ISBN: 978 88 386 64038.